



## Alternativen zu NIR-Pigmenten abgeschaut von der Natur

Dr. Bernd Neumann

Institut für Lacke und Farben Magdeburg gGmbH

Seit etwa 20 Jahren wird von „cool coatings“ berichtet, die auf Pigmenten basieren, welche im Nahinfrarotbereich die Sonnenstrahlung relativ stark reflektieren [1]. Hierzu werden teilweise spezielle Pigmente, Pigmentmischungen oder auch Pigment- / Füllstoffmischungen eingesetzt. Da die Beschichtungen in der Regel farbig sein sollen, müssen die verwendeten Pigmente im sichtbaren Spektralbereich absorbieren. Dies führt jedoch ebenso zu einer Aufheizung des Anstrichs wie eine Absorption im Nahinfraroten (NIR). Von daher wären weiße Beschichtungen mit starker Reflexion im NIR-Bereich ideal, was jedoch nicht unbedingt dem ästhetischen Geschmackempfinden jedes Menschen entspricht.

Neben der Verwendung von Pigmenten existieren Alternativen, um eine unerwünscht starke Aufheizung von Oberflächen zu vermeiden, die dem direkten Sonnenlicht ausgesetzt sind. Phase Change Materials (PCM), wie z.B. Wachse mit relativ niedrigen Schmelztemperaturen oder Salzhydrate, die bei niedrigen Temperaturen ihr Hydratwasser abgeben können, bieten die Möglichkeit, Temperaturspitzen abzufangen [2]. Die Energie zum Aufschmelzen des Wachses oder der Hydratwasserabgabe wird der Umgebung entnommen und hält für die Dauer dieses Vorgangs die lokale Temperatur konstant. Anschließend müssen diese Materialien wieder regeneriert werden.

Ein naturnaher Ansatz, der zudem auch relativ preiswert ist, besteht im Begrünen von Fassaden- und Dachflächen [3]. Hier sind es Pflanzen, die durch Reflexion und Wasserverdunstung ein Absenken der Oberflächentemperatur ermöglichen. Solche Systeme sind immer an die Verfügbarkeit von Wasser gebunden, die

jedoch nicht in allen Regionen der Erde gewährleistet ist.

Neueste Entwicklungen basieren z.B. auf der Verwendung von Pigmenten, die im NIR-Bereich fluoreszieren und somit einen Teil der im Sichtbaren absorbierten Energie direkt in rote oder NIR-Fluoreszenz umwandeln [4]. Interessant hierbei ist, dass auch der Blattfarbstoff Chlorophyll im Roten fluoresziert, im realen Blatt jedoch nur mit geringer Ausbeute [5]. Des Weiteren sind photonische Schichtaufbauten präsentiert worden, die unter bestimmten Bedingungen, durch langwellige Abstrahlung im Infrarotbereich (IR), kühlen können. Wichtig hierbei sind eine sehr hohe solare Reflexion (ca. 97 %) und selektive IR-Emissionen in den atmosphärischen Fenstern von 7-14  $\mu\text{m}$  bzw. 8-13  $\mu\text{m}$  und 16-24  $\mu\text{m}$  bei möglichst klarem Himmel,

geringer Luftfeuchtigkeit und guter Isolation gegenüber jedem parasitären Wärmeeintrag durch Leitung oder Strahlung [6].

Ein tieferer Einblick in die Wechselwirkung zwischen Sonnenlicht und der pflanzlichen Vegetation kann für die Materialentwicklung hilfreich sein, um sich von Lösungen, die die Natur im langjährigen Prozess der Evolution geschaffen hat, inspirieren zu lassen. Ausgangspunkt hierfür ist das terrestrische Sonnenspektrum.

### Das Sonnenspektrum – eine Frage der Perspektive

Das Sonnenspektrum, das die Erdoberfläche nach Passage durch die Atmosphäre erreicht, zeigt, wie die Strahlungsleistung  $P$  als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  verteilt ist (Abbildung 1). Bei der

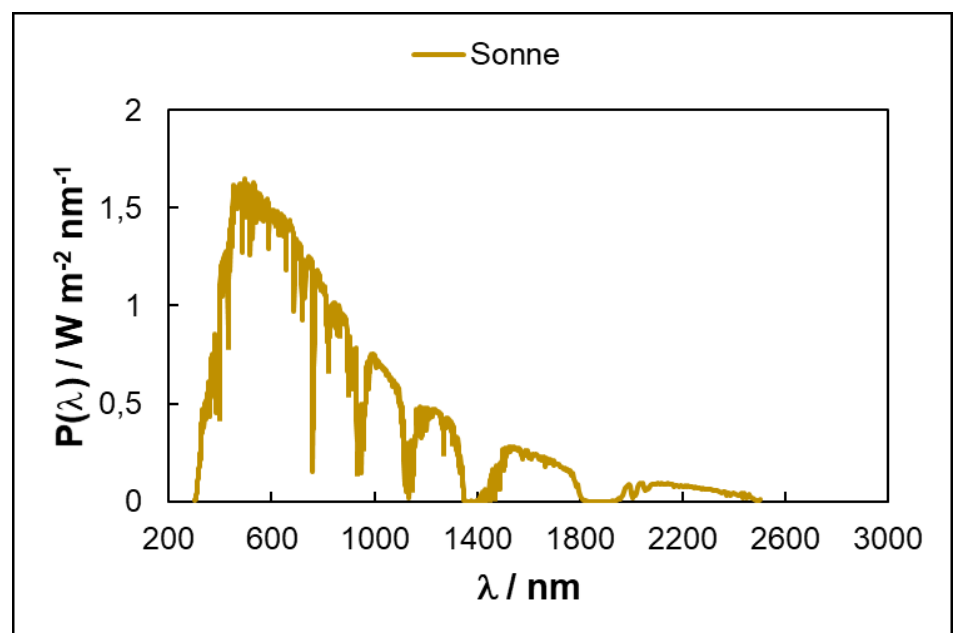


Abb. 1: Terrestrisches Sonnenspektrum  $P$  als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  mit einer Luftmasse von 1,5 („Air Mass“ AM 1.5) entsprechend einer Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ W m}^{-2}$  bzw. einem Zenitwinkel von  $48,2^\circ$ .

üblichen Auftragung der Strahlungsleistung als Funktion der Wellenlänge  $P(\lambda)$  liegt das Maximum im sichtbaren Spektralbereich bei ca. 490 nm, also im Grünen. Dass die Sonne für uns Menschen jedoch gelb erscheint liegt daran, dass die übrigen Wellenlängen im Sichtbaren mit unterschiedlicher Gewichtung ebenfalls zum Gesamteindruck beitragen.

Teilt man das Sonnenspektrum der Abbildung 1 in die Bereiche UV (300-380 nm), sichtbar (Vis) (380-780 nm) und NIR (780-2500 nm) ein, dann ergeben sich die jeweiligen Anteile an der gesamten Strahlungsleistung entsprechend dieser gewählten Intervalle (Tabelle 1).

Tab. 1: Aufteilung der Leistungsanteile für die jeweiligen Teilbereiche wie UV, Vis und NIR für das terrestrische Sonnenspektrum.

Bereich	Intervall / nm	Anteil in %
UV	300-380	3
Vis	380-780	54
NIR	780-2500	43

UV- und sichtbarer Anteil kommen zusammen auf 57 %, während der NIR-Anteil bei 43 % liegt.

Die Form des Sonnenspektrums in Abbildung 1 wird durch die Absorption atmosphärischer Gase wie  $O_3$ ,  $H_2O$  und  $CO_2$  moduliert.

### Die pflanzliche Welt im Nahinfrarot

Die Sensoren heutiger Digitalkameras sind nicht nur im sichtbaren, sondern prinzipiell auch im NIR-Bereich empfindlich [7]. Genau aus diesem Grund sind sie mit Sperrfiltern ausgestattet, die den nahinfraroten Strahlungsanteil des Sonnenlichts blockieren sollen. Entfernt man diesen Sperrfilter, dann wird die Empfindlichkeit in diesem Teil des Spektrums wieder zurückgewonnen. Verwendet man zusätzlich einen Frontfilter auf dem Objektiv der Kamera, der den sichtbaren Spektralbereich weitgehend blockiert und nur noch den NIR-Anteil passieren lässt, kann vorzugsweise der NIR-Bereich erfasst und dargestellt werden. Da für diesen keine

Farbe definiert ist, bieten sich Falschfarben- oder Schwarz-Weiß-Darstellungen an. Der amerikanische Physiker Robert Wood, der als erster die Besonderheiten pflanzlicher Vegetation im Sonnenlicht auf NIR-sensitivem Schwarz-Weiß-Film fotografisch festhielt und publizierte, hat so den Begriff „Wood-Effekt“ geprägt [8]. Man versteht darunter eine weiße Vegetation, die an eine Winterlandschaft im Sommer erinnert (Abbildung 2).



Abb. 2: Landschaftsaufnahme mit einer NIR-sensitiven Kamera und einem 695 nm Frontfilter, der weitgehend sichtbare Anteile herausfiltert und den NIR-Anteil durchlässt, nach Schwarz-Weiß-Konvertierung.

Die Ursachen dieser beeindruckenden Erscheinung, die in Abbildung 2 dargestellt ist, sind mehrere Effekte, die bei der pflanzlichen Vegetation zum Tragen kommen:

- ⇒ Strukturen im Mikrometer-Bereich (und darunter), also in der Größenordnung des Wellenlängenbereichs des Nahinfrarots, an denen Streuprozesse erfolgen [5, 9];
- ⇒ Mehrfache Streuprozesse an den vielen Grenzflächen unterschiedlicher Brechzahlprofile im Blattinneren;
- ⇒ Eine größere Eindringtiefe der NIR-Strahlung, die die zuvor genannten Effekte ermöglicht und sogar verstärkt.

Für sehr kleine Objekte, deren Größe kleiner als ein  $1/10$  der Wellenlänge des sichtbaren Lichts ist, spricht man von Rayleigh-Streuung (benannt nach dem englischen Physiker Lord Rayleigh). Die Streuintensität ist dann proportional zu  $1/\lambda^4$  [10]. Aus diesem Grund erscheint

uns der Himmel blau, da das Licht an sehr kleinen Gasmolekülen gestreut wird. Größere Objekte, wie feine Wassertropfen oder Eiskristalle in den Wolken, erscheinen weiß. Hierbei handelt es sich physikalisch um die Mie-Streuung (benannt nach dem deutschen Physiker Gustav Mie). Die Streuintensität ist dann proportional zu  $1/\lambda^n$  mit  $0 \leq n < 4$  [10].

Wie wirken sich diese Gesetzmäßigkeiten nun im schwarz-weiß konvertierten NIR-Foto unter Verwendung eines langwelligen Frontfilters (z.B. 695 nm) aus, der den sichtbaren Anteil herausfiltert und den NIR-Anteil passieren lässt?

Der ursprünglich blaue Himmel (Rayleigh-Streuung,  $n = 4$ ) erscheint in Abbildung 2 fast schwarz, da der 695 nm Frontfilter den kurzwelligen Anteil, der die höchste Streuintensität aufweist, herausfiltert (Abbildung 3). Jenseits der 695 nm ist die Streuintensität für Rayleigh-Streuer wie die Gasmoleküle der Atmosphäre verschwindend gering. Die Blätter und Gräser in Abbildung 2 erscheinen weiß, die Wolken bleiben weiß, da es sich hierbei um Mie-Streuer handelt ( $0 \leq n < 4$ ). Abbildung 3 verdeutlicht, dass in diesem Fall noch immer genügend Streuintensität jenseits der 695 nm im langwelligen bzw. NIR-Bereich bis 1200 nm verbleibt.

Im Ergebnis erhält man mit der NIR-Fotografie eine bessere Fernsicht sowie einen stärkeren Kontrast. Wegen dieser Effekte war die NIR-Fotografie in ihren Anfängen besonders für die militärische Aufklärung interessant. In den 1980er Jahren wurde diese Technik zur Dokumentation des „Waldsterbens“ in den Medien durch rote Falschfarben-Bilder ursprünglich grüner Vegetation bekannt. Heute sind die Anwendungen sehr breit gefächert und reichen von NIR-Signaturen in Banknoten, Ausweisen und Pfandwertzeichen bis hin zur Fernerkundung der Erdoberfläche mit Hilfe von Drohnen, Flugzeugen und Satelliten, die sowohl zivil als auch militärisch motiviert sind.

### Blattgrün und Fotosynthese

Es ist zu anzunehmen, dass die pflanzliche Vegetation sich wahrscheinlich über einen entsprechend langen Zeitraum an

das Strahlungsangebot der Sonne anpassen konnte. Abbildung 4 zeigt eine gewisse Ähnlichkeit zwischen dem Spektrum eines grünen Einzelblatts mit dem Leistungsspektrum der Sonne. Das Ausmaß der Ähnlichkeit hängt jedoch von der Darstellung ab (Wellenlänge oder Wellenzahl verhalten sich hier unterschiedlich) und kann somit nicht als Beweis für eine evolutionäre Entwicklung angesehen werden [11].

Betrachtet man das Reflexionsspektrum des grünen Einzelblatts, aufgetragen über der Wellenzahl, dann liegen die Absorptionen des Blattgrüns im UV bei sehr geringer Leistung und erstrecken sich bis zum Maximum des Nahinfraroten der Strahlungsleistung des Sonnenspektrums, das in dieser Darstellung bei etwa  $10000\text{ cm}^{-1}$  ( $1000\text{ nm}$ ) liegt und nicht bei  $20408\text{ cm}^{-1}$  ( $490\text{ nm}$ ) in Abbildung 1. Der Grund hierfür liegt in den Einheiten.  $P(\nu)$  hat die Einheit  $\text{W m}^{-2}\text{ cm}^{-1}$ ,  $P(\lambda)$  hat die Einheit  $\text{W m}^{-2}\text{ nm}^{-1}$ .  $P(\nu)$  wird formal aus  $P(\lambda)$  durch Multiplikation mit  $\lambda^2$  erhalten, deshalb unterscheiden sich Form und Maxima der beiden Darstellungen.

Eine Absorption im Roten liefert somit deutlich mehr Leistung als diejenige im UV. Im Maximum des Sonnenspektrums ist die Reflexion des Blattes mit ca. 50-60 % maximal, aber 40-50 % werden noch immer absorbiert. Das Maximum der Reflexion des Blattes fällt in dieser Darstellung mit dem Maximum des Sonnenspektrums zum großen Teil zusammen.

Warum aber hat die Natur im NIR-Bereich für das Blatt keinen höheren Reflexionsgrad „eingrichtet“, wo doch empfindliche Proteine und die DNS innerhalb der Zellen vor Überhitzung zu schützen sind? Die Antwort liegt in einem Kompromiss aus Reaktionsumsatz, der von einer größeren Reaktionsgeschwindigkeit bei erhöhter Temperatur profitiert und dem Zelltod bei Temperaturen oberhalb von  $40$  oder  $50^\circ\text{C}$ , der verhindert werden soll, begründet.

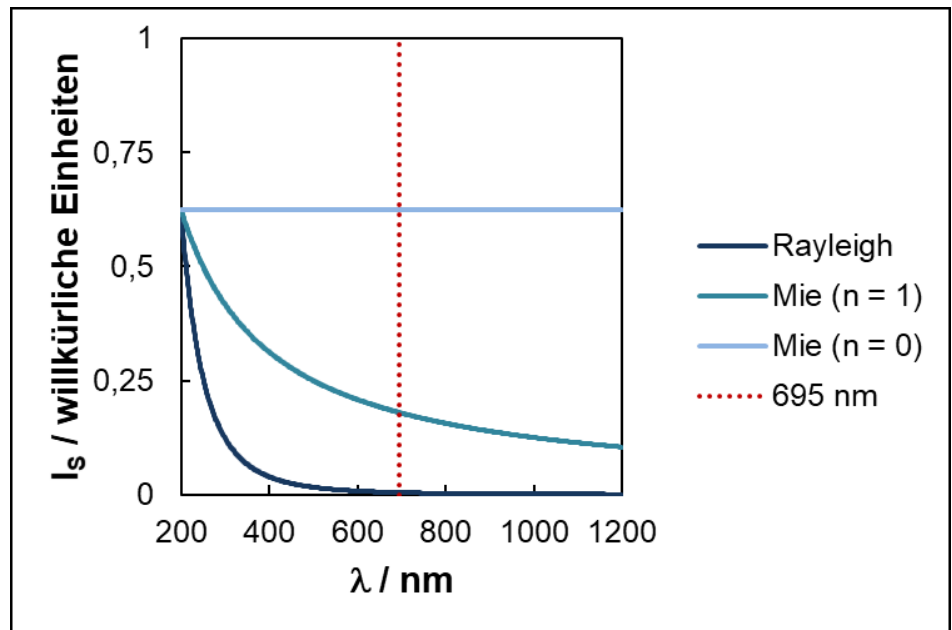


Abb. 3: Streuintensität  $I_s$  als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  für Rayleigh- und Mie-Streuung. Die Wellenlängenposition des 695 nm Frontfilters ist ebenfalls dargestellt. Diese Linie markiert grob den Übergang zwischen dem sichtbaren und dem Nahinfrarot-Bereich.

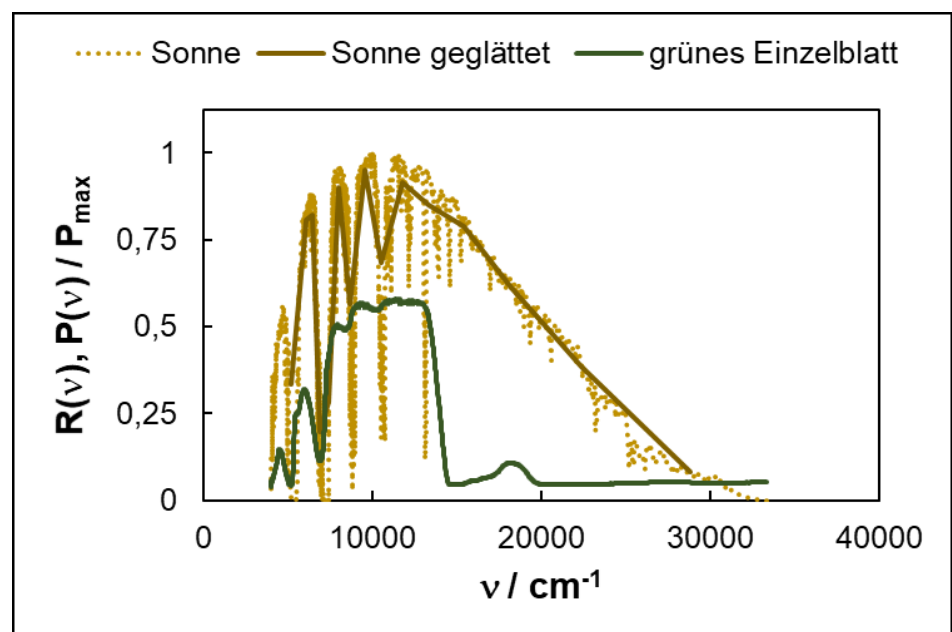


Abb. 4: Reflexionsspektrum  $R$  eines grünen Einzelblatts im Vergleich zur normierten Strahlungsleistung der Sonne  $P/P_{\max}$  aufgetragen über der Wellenzahl  $\nu$ .

### Die Glühbirne als Sonnenersatz

Für vergleichende Untersuchungen ist die Sonne als Strahlungsquelle nicht besonders gut geeignet, da die tatsächlich auf der Erde ankommende Strahlungsleistung ständigen Schwankungen, z.B. durch Wolkenbildung, unterworfen ist, die berücksichtigt werden müssen. Im Labor hingegen lassen sich relativ konstante Strahlungsbedingungen ein-

fach durch Verwendung einer Halogen-glühbirne realisieren. Es muss jedoch beachtet werden, dass eine Glühbirne ein anderes Leistungsspektrum als die Sonne besitzt. Dieses lässt sich nach Planck berechnen [12], wenn z.B. eine Temperatur von  $2700\text{K}$  für die Temperatur des Glühdrahts zugrunde gelegt wird (Abbildung 5). Da der Glaskörper der Halogenlampe sich während des Betriebs auf ca.  $100^\circ\text{C}$  ( $373\text{K}$ ) aufheizt,

wird er somit zum langwelligen IR-Strahler. Die Sonne hingegen liefert kaum langwelliges IR (Abbildung 1 und 4), folglich würden die mit ungefiltertem Halogenlicht erhaltenen Ergebnisse verfälscht. Im Experiment lässt sich dieser langwellige IR-Anteil durch Verwendung einer Glasplatte zwischen Lampe und Probe weitgehend herausfiltern.

Soll quantifiziert werden, wie gut ein Material die Strahlung einer Halogen-Glühbirne, die sichtbares Licht und viel NIR-Strahlung liefert, reflektiert, dann kann dies über die integrale Reflexion  $R_{\text{integral}}$  erfolgen [13, 14]. Diese Kenngröße ist analog zu der der solaren Reflexion  $R_{\text{Solar}}$ , nur mit dem Unterschied, dass sie das im Experiment verwendete Glühlampenspektrum statt das der Sonne berücksichtigt.

$$R_{\text{integral}} = \frac{\sum_{\lambda} [P(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda]}{\sum_{\lambda} [P(\lambda) \cdot \Delta\lambda]}$$

mit

$P(\lambda)$ : Planckfunktion für  $T = 2700\text{K}$

$R(\lambda)$ : Reflexionsspektrum

$\lambda$ : Wellenlänge in nm

$\Delta\lambda$ : Wellenlängenintervall in nm

Die solare Reflexion wird ebenfalls nach obenstehender Gleichung berechnet. Dabei wird  $P(\lambda)$  durch das Sonnenspektrum von Abbildung 1 ersetzt.

### Aufheizung – grünes Einzelblatt

Das Aufheizverhalten eines grünen Einzelblatts wurde mit Hilfe einer Halogen-Glühlampe untersucht, deren langwellige IR-Strahlung ( $>2500\text{ nm}$ ) durch eine Glasplatte weitgehend herausgefiltert wurde.

Die maximale Temperaturdifferenz  $\Delta T_{\text{max}}$  gegenüber der Ausgangstemperatur  $T(0)$  infolge der Aufheizung wurde durch eine Kurvenanpassung an die Messdaten über folgende Gleichung erhalten [13, 14]:

$$\Delta T(t) = T(t) - T(0) = \Delta T_{\text{max}} \cdot [1 - \exp(-t/\tau)]$$

mit

$T(t)$ : Temperatur zur Zeit  $t$  in  $^{\circ}\text{C}$

$T(0)$ : Ausgangstemperatur in  $^{\circ}\text{C}$

$\Delta T_{\text{max}}$ : maximale Temperaturdifferenz

$t$ : Zeit in min

$\tau$ : Zeitkonstante in min

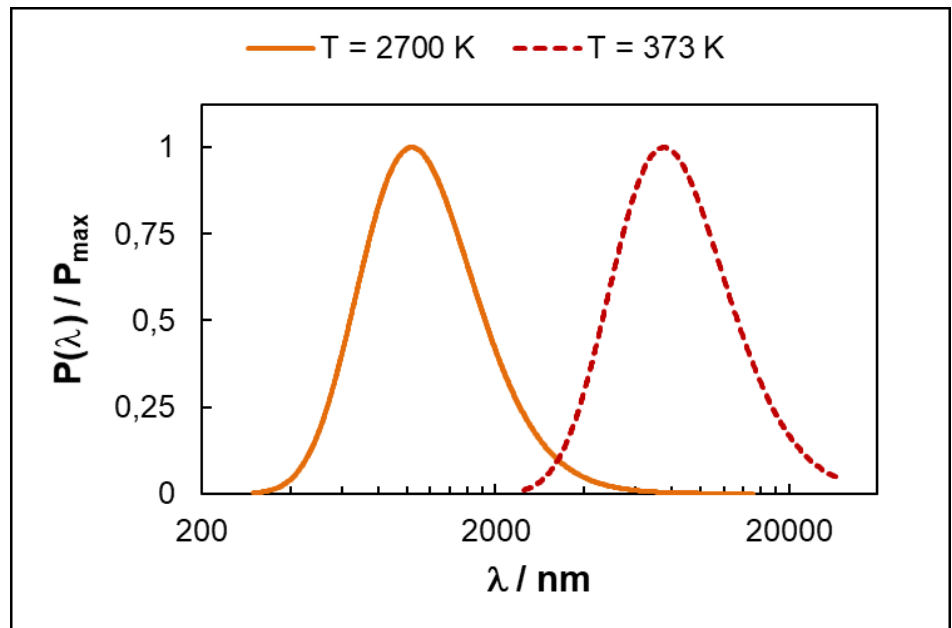


Abb. 5: Normierte Leistungsspektren nach Planck für  $T = 2700\text{K}$  (Glühfaden) und  $T = 373\text{K}$  (Glaskörper).

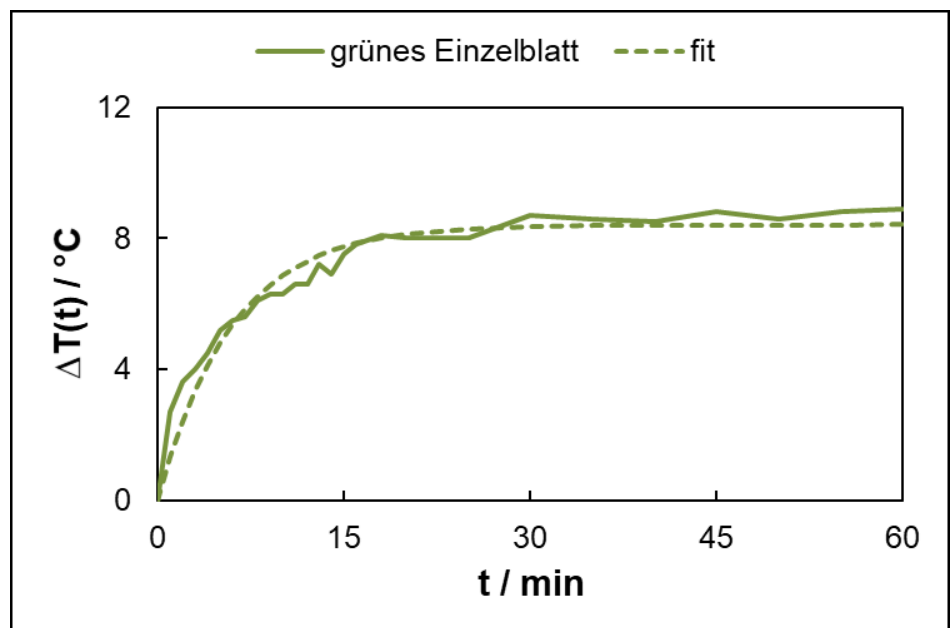


Abb. 6: Aufheizung eines grünen Einzelblatts unter gefiltertem Halogenlicht.

Worin liegt nun die Besonderheit der pflanzlichen Vegetation? Wie bereits zuvor erwähnt, werden nur knapp 60 % der NIR-Strahlung reflektiert und somit noch immer etwas mehr als 40 % absorbiert. Das in den Pflanzen vorhandene Wasser kann ebenfalls einen Teil der Wärme aufnehmen. Durch Verdunstung entzieht es der Umgebung Energie und sorgt für eine Kühlung. Der Kühleffekt durch Wasserverdunstung überwiegt hierbei allerdings den durch Reflexion. Eine grüne

oder rote Blattfärbung ist für die Wärmeregulation dabei unerheblich.

Wie lassen sich diese Prinzipien für die Materialentwicklung nutzen, um möglichst kühle Oberflächen zu erzeugen? Denkbar sind Materialien, die, ähnlich wie Blätter, eine Struktur aufweisen, die viele reflektierende Grenzflächen besitzen. Mit zusätzlicher Porosität wäre bei Ankopplung an ein Wasserreservoir auch die Möglichkeit der Wasserverdunstung gegeben. Hierbei wären dann Maßnahmen zur Vermeidung von Algen- und



Pilzwachstum zu treffen. Hinzu kommt, dass Wasser nicht immer überall verfügbar ist. Eine Ankopplung an einen geschlossenen Kühlwasserkreislauf würde den Wasserverlust durch Verdunstung vermeiden. Solarzellen könnten hierbei die Energie für die Wasserpumpen liefern.

### Poröse Glasfritte als einfaches Blattmodell – besser als die Natur?

Ein einfaches Beispiel für das NIR-reflektierende Potenzial eines Pigment-freien Systems ist eine Glasfritte. Durch die mehrfache Abfolge von Grenzflächen zwischen Luft (Brechzahl  $n = 1$ ) und Glas ( $n = 1,4-1,5$ ), liegt ein System vor, das wegen der Vielfachreflexion an diesen Grenzflächen weiß erscheint.

Während die trockene Glasfritte fast im gesamten relevanten Wellenlängenbereich überwiegend stark reflektiert, zeigt das Spektrum der nassen Fritte ab 800 nm eine große Ähnlichkeit zum dem des grünen Einzelblatts. Diese Ähnlichkeit ist in der Dominanz der Absorptionsbanden des Wassers begründet.

Für die trockene Glasfritte wurde  $\Delta T_{\max} = 7,4^{\circ}\text{C}$  bestimmt, für die nasse Glasfritte  $\Delta T_{\max} = 4,6^{\circ}\text{C}$ . In beiden Fällen ist die Glasfritte also besser als das Einzelblatt, was die Eigenschaft Aufheizung anbetrifft. Das Blatt kann jedoch neben der Wärmeregulation zusätzlich auch noch Fotosynthese betreiben, Zellen reparieren, Blattfarbstoffe synthetisieren und ersetzen usw. Das Optimum einer Summe von Eigenschaften ist in der Natur entscheidend, nicht die Einzeleigenschaft.

Selbst Wachs liegt ganz gut in der solaren und integralen Reflexion sowie in der Aufheizung, da die Eigenfärbung gering ist und relativ viel Streuung an unterschiedlich orientierten kristallinen Domänen erfolgt.

Was lässt sich daraus für die Praxis ableiten? Materialien mit geringer Eigenfärbung, in welche Strukturen eingearbeitet werden können, die im Mikrometer-Bereich liegen, wären hervorragend geeignet, eine hohe solare Refle-

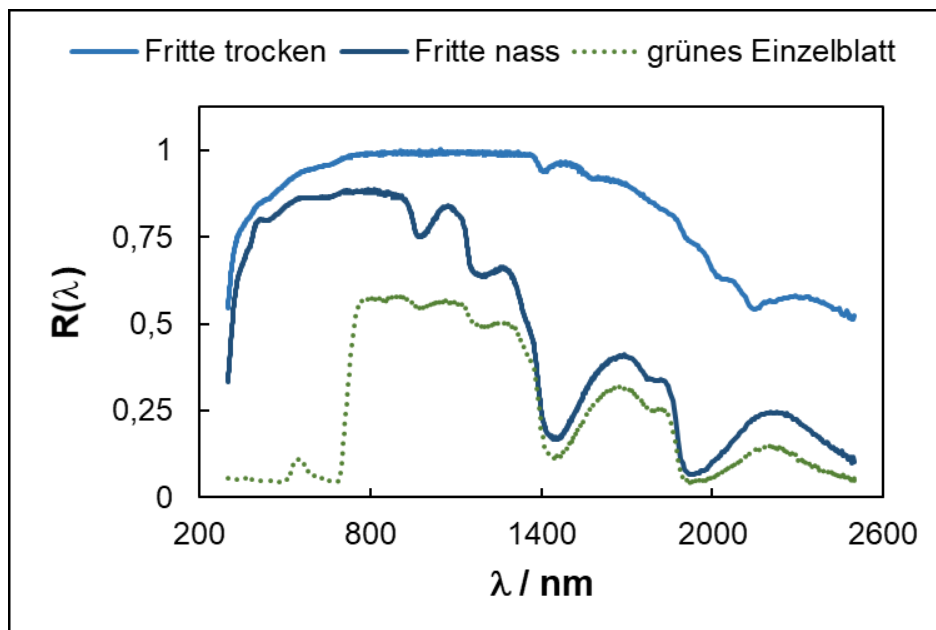


Abb. 7: Reflexionsspektren einer trockenen und einer nassen Glasfritte im Vergleich zu dem eines grünen Einzelblatts.

Tab. 2: Integrale Reflexionswerte und unter gefiltertem Halogenlicht gemessene Temperaturdifferenzen für ein grünes Einzelblatt, Wachs und eine Glasfritte.

Probe	$R_{\text{solar}}$ in %	$R_{\text{integral}}$ in %	$\Delta T_{\max}$ in $^{\circ}\text{C}$
grünes Einzelblatt	27,2	33,8	8,4
Wachs	72,1	49,1	8,8
Glasfritte nass	76,8	54,6	4,6
Glasfritte trocken	93,3	90,3	7,4

xion zu erreichen. Solche Strukturen lassen sich relativ einfach über Schäume realisieren. Kunststoffschäume wären einfach herzustellen und bieten den Vorteil sehr geringer Dichte, müssen aber vor Brand geschützt werden, was oftmals den Einsatz Umwelt- und Gesundheits-bedenklicher Verbindungen erforderlich macht. Zudem stellen solche Kunststoffschäume dann eine Quelle für kontaminiertes Mikroplastik dar. Fassaden- und Dachelemente aus Glas- bzw. Mineralschäumen hätten den Vorteil ohne Flammenschutz auszukommen. Sie könnten in den obersten Schichten über Pigmente eingefärbt werden, um noch immer eine insgesamt hohe Reflexion im gesamten Wellenlängenbereich sicherzustellen. Die resultierenden Farbtöne wären dann mehr pastellfarben. Die NIR-Strahlung würde in dem Fall aber noch immer überwiegend in den tieferen farblosen Schichten reflektiert.

### Pigmente, Füllstoffe & andere Materialien

Neben dem grünen Einzelblatt sowie der Glasfritte wurde eine Vielzahl von Pigmenten und Füllstoffen in Bezug auf ihr Aufheizverhalten unter gefiltertem Halogenlicht untersucht. Aus Gründen der mechanischen Stabilität für die UV/Vis/NIR-Messungen wurden sämtliche pulverförmigen Pigment- und Füllstoffe mit einem Wachs im Verhältnis drei-zu-eins zu Tabletten gepresst. Die Ergebnisse dieser Aufheizexperimente sind in Abbildung 8 dargestellt.

Die in Abbildung 8 dargestellten Messwerte zeigen, dass sich die Leistungen der untersuchten NIR-Pigmente in einer Wachsmatrix in vielen Fällen nicht wesentlich von organischen oder anorganischen Standardpigmenten unterscheiden. Besonders hervorzuheben sind hierbei die Füllstoffe, die allesamt am oberen Ende von  $R_{\text{integral}}$  gruppiert sind wegen der geringen Absorption im Sichtbaren und gleichzeitig hoher NIR-

Reflexion. Die untersuchte trockene Glasfritte schneidet sogar besser ab als ein Titandioxid-Wachs-Pressling, was zum Teil an der starken UV-Absorption des Titandioxids selbst liegt und zum anderen Teil an der IR-Absorption des Wachsanteils. Hier wären schwach UV-absorbierende Materialien im geschäumten Zustand eine Alternative zu Titandioxid. Schaumstrukturen bieten neben einem geringen Gewicht den weiteren Vorteil einer geringen Wärmeleitung.

Dass die Temperaturdifferenzen in Abbildung 8 bei  $R_{\text{integral}} = 1$ , also 100 % Reflexion nicht Null werden, liegt an der schlechten Isolation der Proben gegenüber der Umgebung, die somit parasitären Wärmeeinträgen durch Leitung und Strahlung ausgesetzt sind.

### Zusammenfassung / Fazit

Die Besonderheiten der pflanzlichen Blattstrukturen mit den daraus resultierenden Streuprozessen wurden beschrieben und am Beispiel einer porösen Glasfritte auf Analogien zu Blattstrukturen hin untersucht. Die Glasfritte zeigte sowohl im trockenen als auch im nassen Zustand geringere Oberflächentemperaturen als ein grünes Einzelblatt unter Bestrahlung mit gefiltertem Halogenlicht. Es wurden solare und integrale Reflexionswerte für unterschiedliche Pigmenttypen und Füllstoffe in Form von Wachs-Presslingen berechnet und ebenfalls die Oberflächentemperaturen unter Bestrahlung mit gefiltertem Halogenlicht gemessen. Für die Mehrzahl der untersuchten Materialien lagen die erzielten Temperaturen etwa 7-11°C oberhalb der Umgebungstemperatur. Die Reflexionseigenschaften sowie das Aufheizverhalten der untersuchten NIR-Pigmente unterscheiden sich nicht wesentlich von dem der organischen oder anorganischen Standardsysteme. Das Potenzial von Füllstoffen sowie das geschäumte Material für pigmentfreie oder pigmentarme Fassaden- und Dachelemente wurde diskutiert.

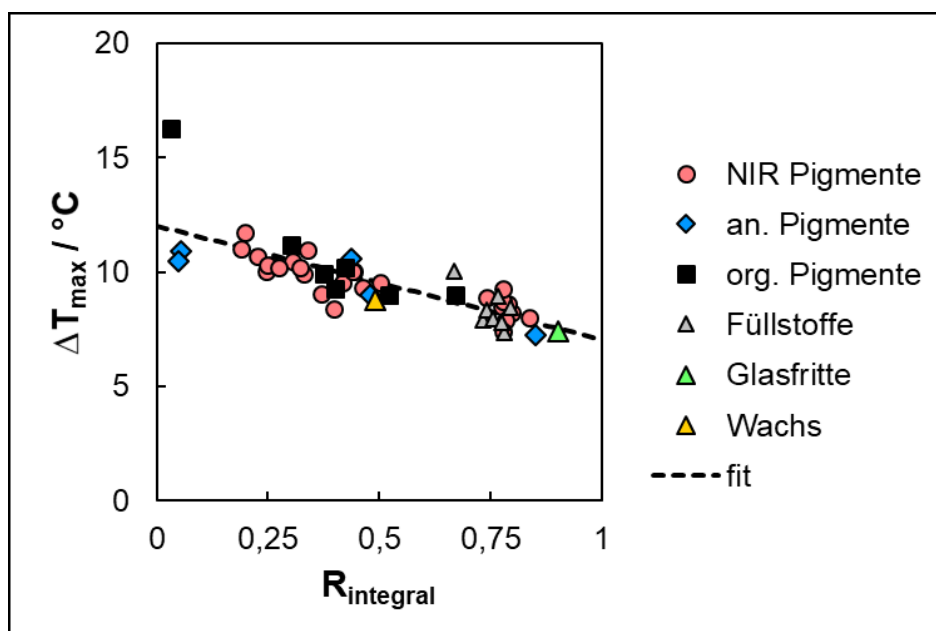


Abb. 8: Maximale Temperaturdifferenzen unter gefilterter Halogenlichtbestrahlung für verschiedene Materialien in Abhängigkeit der integralen Reflexionswerte.

### Literatur

- [1] V. Fang, J. Futter, J. Kennedy, J. Manning, *GNS Science Report 2013/39*, 1-20
- [2] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabezy, H. Mehling, *Applied Thermal Engineering*, 23, 2003, 251-283
- [3] O. Saadatian, K. Sopian, E. Salleh, C.H. Lim, S. Riffat, E. Saadatian, A. Tondeshki, M.Y. Sulaiman, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23, 2013, 155-168
- [4] P. Berdahl, S.K. Boocock, G.C.-Y. Chan, S.S. Chen, R.M. Levinson, M.A. Zalich, *Journal of Applied Physics* 123, 2018, 193103, 1-10
- [5] E. B. Knipping, *Remote Sensing of Environment* 1, 1970, 155-159
- [6] Md. M. Hossain, M. Gu, *Adv. Sci.*, 3, 2016, 1-10
- [7] K. Mangold, J. A. Shaw, M. Vollmer; *Eur. J. Phys.* 34, 2013, 51-71
- [8] R. Wood, *The Century Magazin*, 1910, 565-572
- [9] D.M. Gates, H.J. Keegan, J.C. Schleiter, V.R. Weidner, *Applied Optics*, Vol. 4, No. 1, 1965, 11-20

[10] G. Kortüm, *Reflexionsspektroskopie*, Springer-Verlag Berlin, 1969, 94

[11] B.H. Soffer, D.K. Lynch, *Am. J. Phys.* 67 (11), 1999, 946-953

[12] H. Stroppe, *Physik*, Fachbuchverlag Leipzig, 2005, 415

[13] B. Neumann, *Farbe und Lack*, 2018, 54-58

[14] B. Neumann, *European Coatings Journal*, 2018, 40-44

### Danksagung

Teile dieser Arbeit resultieren aus dem Projekt MF 150111, das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) der Bundesrepublik Deutschland gefördert wurde.

B. Neumann dankt S. Pietsch für die präparativen Arbeiten sowie die spektroskopischen Messungen.